

# **SIMULACIÓN NUMÉRICA APLICADA A LA INTERACCIÓN AGUA SUBTERRÁNEA – HUMEDALES EN LA LLANURA PAMPEANA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

Bocanegra, E.<sup>1,2</sup>, Quiroz Londoño, O. M.<sup>1,3</sup>, Romanelli, A.<sup>1,3</sup>, Martínez, D.<sup>1,3</sup>, Ferrante, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Mar del Plata. Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. CC 722. Mar del Plata. Argentina. <sup>2</sup> CIC. <sup>3</sup> CONICET  
ebocaneg@mdp.edu.ar; aromanel@mdp.edu.ar; qlondono@mdp.edu.ar; demarti@mdp.edu.ar; aferran@mdp.edu.ar

## **RESUMEN**

En la llanura pampeana los cuerpos de agua superficial son parte activa del sistema de flujo del agua subterránea. La laguna La Salada y su área de influencia se ubican en las cercanías de la localidad La Dulce (Provincia de Bs. As.), sobre la divisoria sur de la cuenca del Río Quequén. El objetivo del trabajo es cuantificar la interacción entre los cuerpos de agua de la laguna, acuífero y río y establecer el balance global de masas a través de la modelación numérica. Los resultados de la simulación del flujo muestran en régimen estacionario el comportamiento efluente – influente de la laguna y el flujo de agua subterránea hacia el río. La simulación del régimen transitorio muestra un buen ajuste entre los niveles observados y calculados durante el periodo 2007-2010 en un freático ubicado entre la laguna y el río. Los términos del balance global de masas incluyen precipitación 116 hm<sup>3</sup>/año, evapotranspiración 82.1 hm<sup>3</sup>/año, escurrimiento superficial 1.8 hm<sup>3</sup>/año, evaporación en la laguna 5 hm<sup>3</sup>/año, recarga del acuífero 16 hm<sup>3</sup>/año, descarga de agua subterránea a la laguna 6 hm<sup>3</sup>/año, descarga de agua subterránea al río 9.5 hm<sup>3</sup>/año y extracción para consumo urbano 0.5 hm<sup>3</sup>/año. La integración de herramientas numéricas de simulación del flujo con estudios previos de modelación hidrogeoquímica permitió alcanzar resultados consistentes de la evaporación en la laguna con respecto al valor obtenido por el balance hídrico. La metodología utilizada constituye un aporte al abordaje de estudios cuantitativos sobre la interacción aguas subterráneas – aguas superficiales en la llanura pampeana.

Palabras clave: simulación numérica – agua subterránea – humedal – llanura pampeana

## **ABSTRACT**

In the Pampa plain the surface water bodies are integral parts of groundwater flow systems. La Salada wetland is located on the watershed of the Quequén River basin, next to La Dulce town (Buenos Aires Province). The aim of the present study is both to quantify the wetland - aquifer – river interactions and to establish the mass global balance through the numerical modeling. Results of flow simulation in the steady regime show the effluent-influent behavior of the wetland and the discharge of groundwater to the Quequén River. The transient regime shows a noticeable fitness observed between the simulated and the measured values compared to the daily record piezometer (2007-2010). Mass global balance comprise precipitation 116 hm<sup>3</sup>/year, evapotranspiration 82.1 hm<sup>3</sup>/year, runoff 1.8 hm<sup>3</sup>/año, evaporation in the wetland 5 hm<sup>3</sup>/year, recharge to the aquifer 16 hm<sup>3</sup>/ year, groundwater discharge to the wetland 6 hm<sup>3</sup>/ year, groundwater discharge to the river 9.5 hm<sup>3</sup>/ year y extraction for human consumption 0.5 hm<sup>3</sup>/ year. The joint tools of numerical simulation of flow and previous studies of hydrogeochemical modeling allow reach similar results for the evaporation in the wetland compared to those from the water balance. The study constitutes a contribution to the assessment of the groundwater – surface water interactions in the Pampa plain.

Key words: numerical modeling – groundwater – wetland – Pampa plain

## INTRODUCCIÓN

Los humedales constituyen en conjunto una extensión de superficie relativamente escasa en comparación con la de otros ecosistemas. Sin embargo, los rasgos ambientales que confluyen en su entorno confieren a este tipo de biotopos una productividad y diversidad biológicas de las más altas del planeta (Finlayson et al. 1999).

Los cuerpos de agua superficial como ríos, lagos, lagunas y demás humedales son parte activa del sistema de flujo del agua subterránea (Winter, 1999). Los humedales que dependen del agua subterránea manifiestan una gran diversidad de formas, circunstancias, salinidades (desde agua dulce a salmueras saturadas) y hábitats. El agua subterránea es la contribución más permanente y asegura la existencia de hábitats permanentes, que son esenciales para un amplio conjunto de plantas y animales no migratorios (Custodio, 2001).

Los humedales que dependen del agua subterránea son áreas de descarga de agua subterránea que corresponden a sistemas de flujos locales, intermedios o regionales (Tóth, 1999). En diferentes trabajos se han considerado las condiciones de flujo subterráneo y sus relaciones con el flujo superficial, destacando la importancia ecológica de estas relaciones, los impactos humanos y su influencia con la disponibilidad del recurso (Sophocleus, 2002). Existen diversos estudios de descarga de agua subterránea, perenne o estacional, en función del nivel del agua en el humedal y de las condiciones piezométricas del agua subterránea (Sacks et al., 1992; Lee et al., 1977; Lewis, 1987; Carrera, 1997; Hunt et al., 1996).

En la Provincia de Buenos Aires, existe un gran número de cuerpos de agua someros permanentes o temporales de variada extensión denominados “lagunas”, con estadios evolutivos muy distintos, cuya distribución, morfología y tipología se relaciona con el clima, el relieve y la geología (Dangavs, 2005). Dichos cuerpos de agua superficial son parte activa del sistema de flujo del agua subterránea. La laguna La Salada, con una extensión de 5.78 km<sup>2</sup>, se ubica sobre la divisoria sur de la cuenca del Río Quequén. El objetivo del trabajo es cuantificar la interacción entre los cuerpos de agua de la laguna, acuífero y río y establecer el balance global de masas.

## CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La laguna La Salada y su área de influencia se localizan en la llanura Pampeana en el límite sur oeste de la cuenca del Río Quequén, cerca a la localidad La Dulce, Provincia de Buenos Aires (Fig. 1). Esta zona es denominada desde un punto geomorfológico como “zona de divisoria de aguas con lagunas” Martínez (2007), es caracterizada por la presencia de gran cantidad de lagunas con profundidades variables, alineadas en un cordón de aproximadamente 100 km en dirección NO-SE. Geológicamente, la zona está constituida por sedimentos Pampeanos y Postpampeanos de granulometría variable, entre arenas y limos con intercalaciones arcillosas. Ocasionalmente aparecen niveles de tosca (CaCO<sub>3</sub> pulverulento) y de ceniza volcánica (Teruggi, 1957).

La cota de nivel freático en las captaciones cercanas a la laguna se encuentra entre los 72 y 95 msnm. La distribución de las isopiezas permitió definir un comportamiento efluente – influente de la laguna. Desde las zonas topográficamente más altas se producen flujos concéntricos hacia la laguna, esta a su vez descarga sus aguas en la zona noreste, en dirección al río Quequén (Romanelli et al., 2009).

Las diferentes pendientes de las líneas piezométricas sugieren diferentes valores de transmisividad; en el norte y el oeste, el estrechamiento de las líneas isopiezas puede

asociarse a menores transmisividades mientras que el mayor espaciamento en el resto de la cuenca sugiere valores mayores de transmisividad.

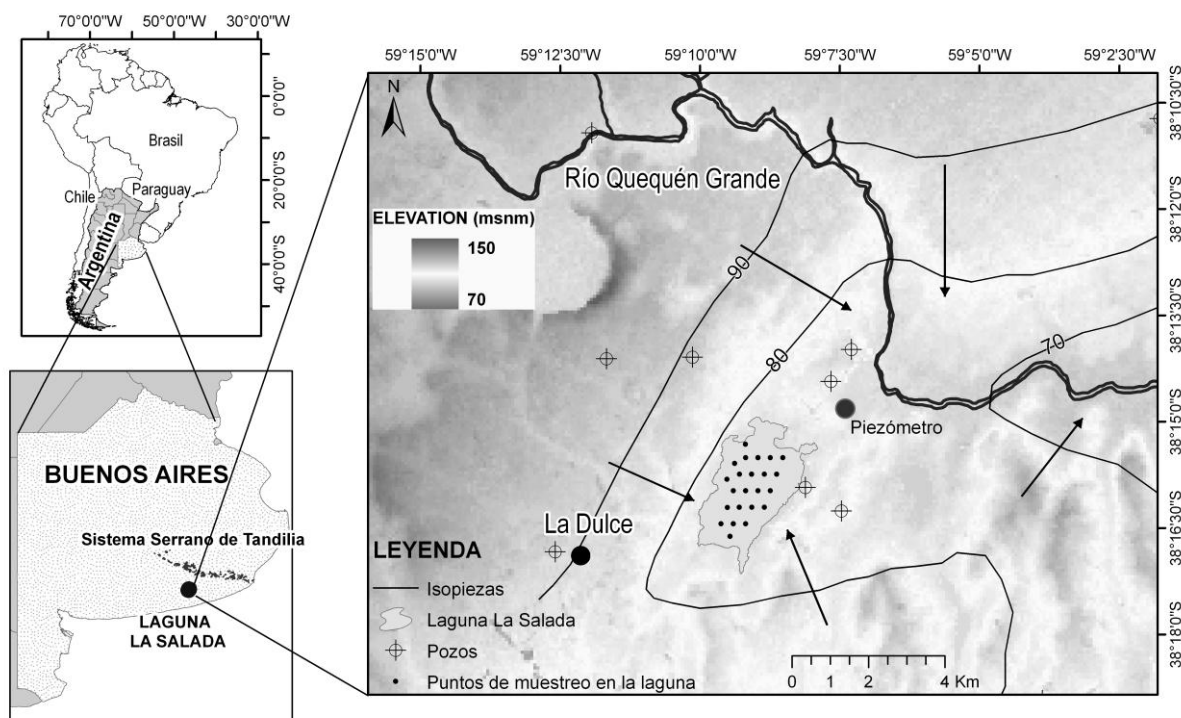


Fig. 1. Mapa de ubicación y de curvas isopiezas

A partir de la evaluación de la información piezométrica, hidroquímica e isotópica se ha podido establecer que el origen del agua de la laguna se debe a la descarga de aguas subterráneas sujetas a evaporación. La modelación hidrogeoquímica tomando como composición inicial a una muestra de agua subterránea, y como composición final a una muestra de agua de la laguna, y utilizando el  $\text{Cl}^-$  como ion conservativo para el cálculo de la evaporación, se obtiene un factor de evaporación de 11.4 (Romanelli et al., 2010).

## METODOLOGÍA

Los términos del balance hídrico se obtuvieron utilizando diferentes métodos: el escurrimiento superficial se determinó por el método del Número de Curva (USDA-SCS, 1964), la evapotranspiración potencial por el método de Penman – Monteith (FAO, 2006), y la recarga se obtuvo del balance hídrico calculado por el método de Thornthwaite y Mather (1957).

Se utilizó para la simulación numérica el código Visual TRANSIN, que es una versión amigable y actualizada del código TRANSIN IV (Medina y Carrera, 2005), que a través del método inverso, permite resolver y estimar los parámetros de las ecuaciones de flujo de agua subterránea y transporte de solutos, a partir de datos de niveles piezométricos y de concentraciones de solutos.

## COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

La precipitación promedio en el período 2007-2010 fue 958 mm/año. La evolución de los componentes del balance hídrico (Fig. 2) muestra que no obstante la gran variabilidad temporal, se produce un ajuste entre el exceso y la precipitación.

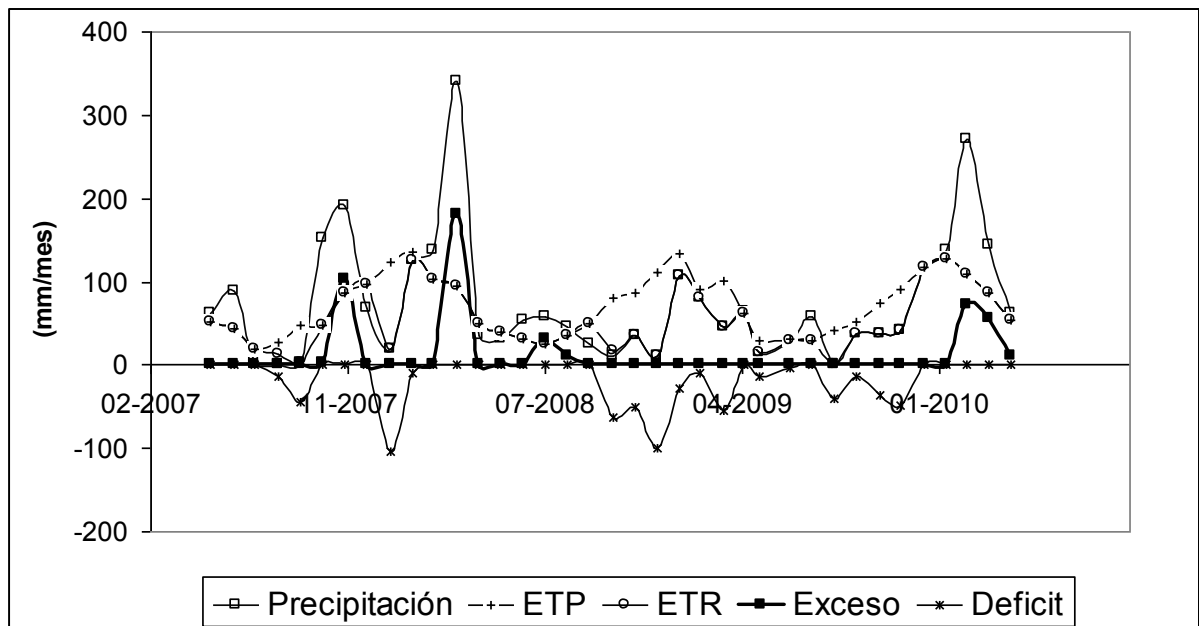


Fig. 2. Componentes del Balance hídrico

## MODELO NUMÉRICO

Se construyó un modelo 2D monocapa, que cuenta con 863 elementos y 417 nodos, que abarca la superficie de la cuenca de 120 km<sup>2</sup> (Fig. 3). En primer lugar se efectuó la simulación del régimen estacionario y luego del régimen transitorio con un paso temporal de 30 días.

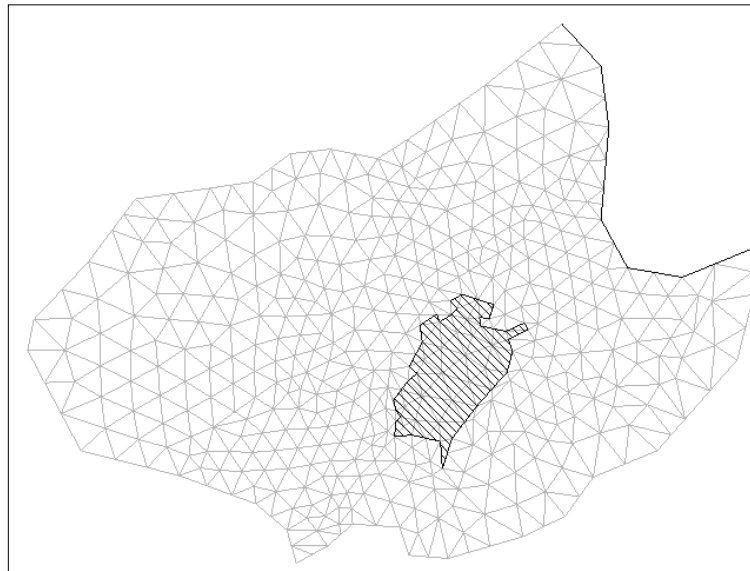


Fig. 3. Malla de elementos finitos

La zonificación de transmisividades se obtuvo a partir de diferencias geomorfológicas observadas sobre la superficie del terreno, utilizando una imagen de satélite ASTER con resolución espacial de 15 m, lo cual permitió definir zonas con texturas y respuestas espectrales diferentes que pudieron ser asociadas con contenido de agua en superficie. Los valores menores corresponden a sedimentos loessicos de los sectores altos de la cuenca, mientras que los valores mayores se asignaron a las partes bajas cercanas al río Quequén, con presencia de estratos de arena gruesa de 60 m de espesor.

La estimación previa de transmisividades es coherente con el análisis realizado sobre las líneas piezométricas (Fig. 4). El coeficiente de almacenamiento se estimó en 0.10. Las condiciones de contorno fueron de condición mixta para la Laguna La Salada y el río Quequén, flujo prescripto para las extracciones y flujo nulo para los restantes bordes de la cuenca.

Se utilizó para la calibración del flujo en régimen estacionario los datos de niveles piezométricos correspondientes al censo realizado en 2007 en molinos, pozos domiciliarios, pozos de riego. El flujo en régimen transitorio se calibró por medio de un freaticómetro con registro diario en el periodo 2007-2010 ubicado entre la laguna La Salada y el río Quequén.

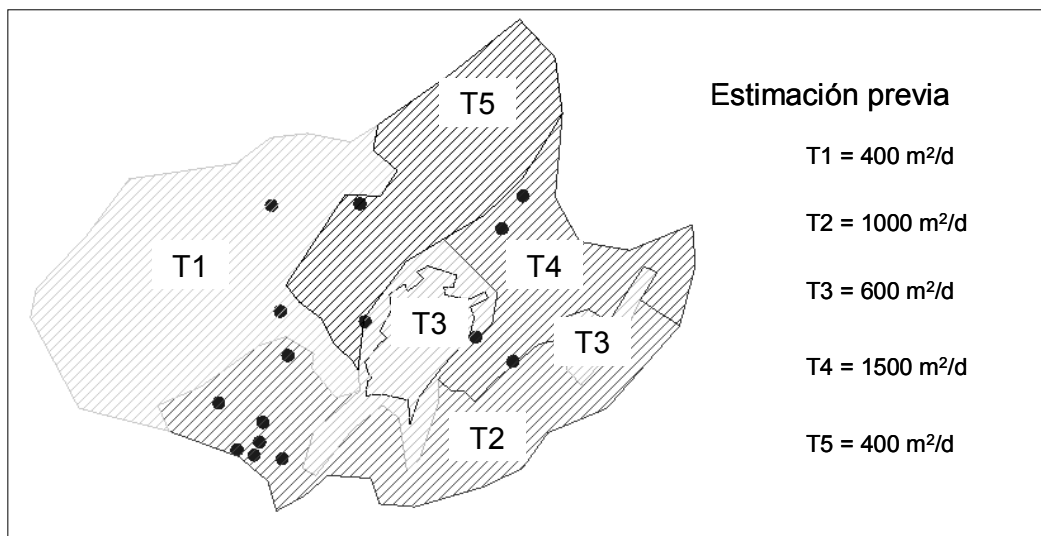


Fig. 4. Zonificación y estimación previa de transmisividades

## RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL FLUJO

Los resultados de la calibración automática se muestran en la Tabla 1. Se aprecia una cierta similitud con los valores estimados y los correspondientes a la estimación previa.

Tabla 1. Calibración automática de las transmisividades

Zonas Hidrogeológicas	Transmisividad estimada ( $\text{m}^2/\text{d}$ )	Estimación previa ( $\text{m}^2/\text{d}$ )
T1	401	400
T2	1645	1000
T3	892	600
T4	3037	1500
T5	333	400

El mapa de niveles piezométricos muestra en régimen estacionario muestra el flujo de aguas subterráneas hacia el río Quequén y un comportamiento efluente – influente de la Laguna La Salada (Fig.5). Se aprecia un buen ajuste entre los valores observados y calculados (Fig. 6). El error absoluto promedio es 1.85 m y el error medio 0.56 m.

La simulación del régimen transitorio muestra también un buen ajuste entre los niveles observados y calculados durante el periodo 2007-2010 en el freaticómetro (Fig. 7). Dichos niveles se encuentran por debajo del nivel de la laguna y por encima de la cota del río Quequén. Si bien en algunos trabajos la laguna La Salada aparecía como parte de una cuenca diferente a la del río Quequén (Bocanegra et al., 2005), estos resultados confirman lo que ya se había propuesto a través de un modelo digital (Romanelli et al, 2009), que los mencionados cuerpos de agua pertenecen a la misma cuenca.

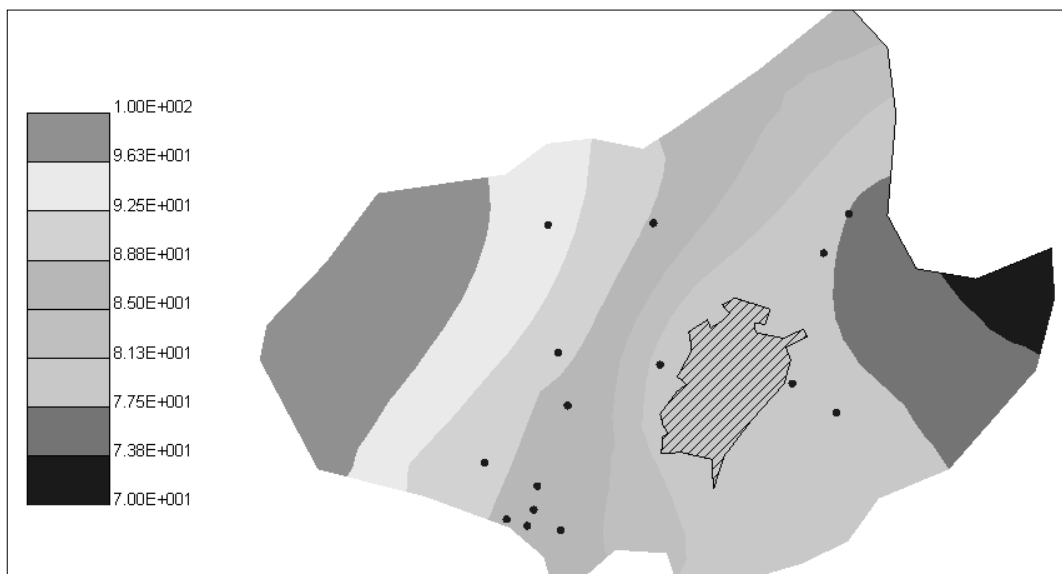


Fig. 5. Mapa de niveles piezométricos calculados en régimen estacionario

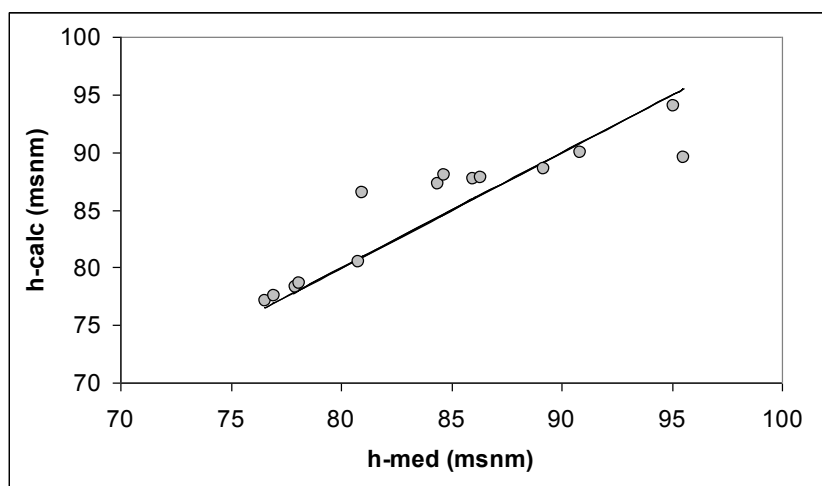


Fig. 6. Niveles piezométricos medidos y calculados en régimen estacionario

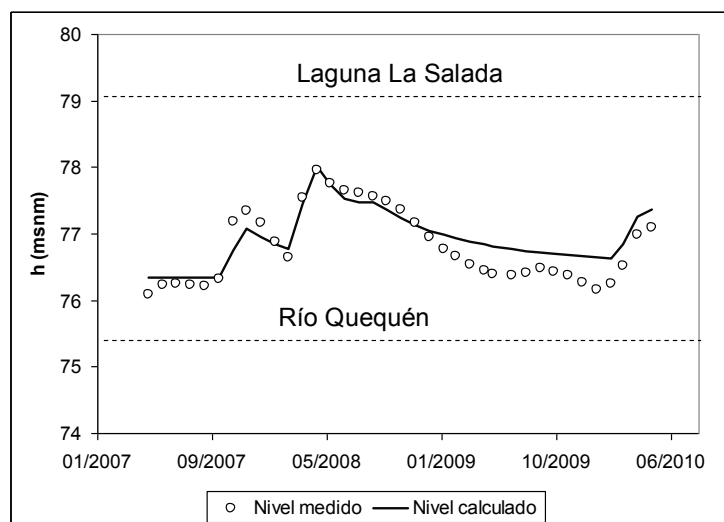


Fig. 7. Niveles piezométricos medidos y calculados en régimen transitorio

## BALANCE GLOBAL DE MASAS DE AGUA

Los componentes del ciclo hidrológico obtenidos a partir del balance hídrico son la precipitación 116  $\text{hm}^3/\text{año}$ , evapotranspiración 82.1  $\text{hm}^3/\text{año}$ , escurrimiento superficial 1.8  $\text{hm}^3/\text{año}$  y recarga al acuífero 16  $\text{hm}^3/\text{año}$  (Fig. 8). Se ha considerado el término correspondiente al volumen de uso de agua del suelo, equivalente a una lámina de 100 mm.

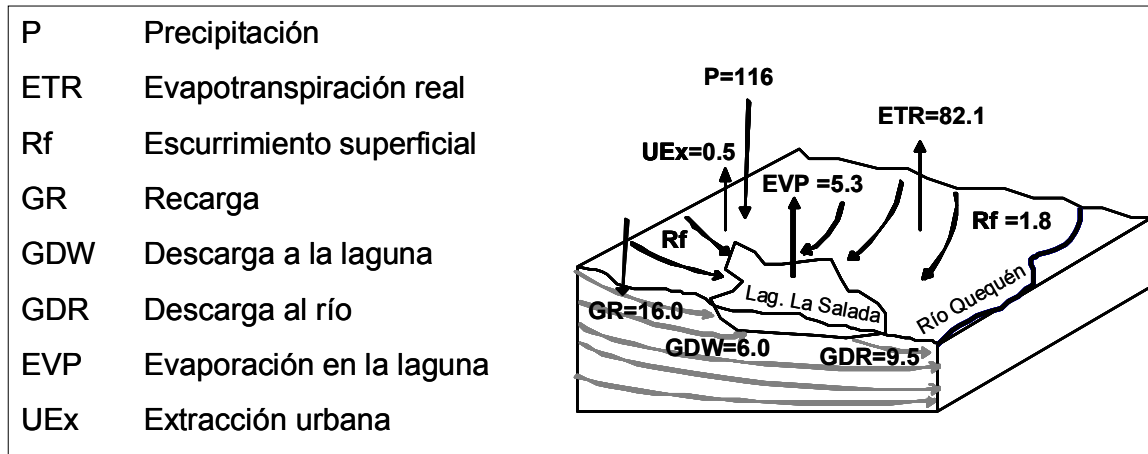


Fig. 8. Balance global de masas

A través de la simulación numérica del flujo subterráneo se obtiene que las salidas del sistema subterráneo más importantes son la descarga a la laguna 6.0  $\text{hm}^3/\text{año}$  y al río 9.5  $\text{hm}^3/\text{año}$ ; la extracción para consumo urbano es 0.5  $\text{hm}^3/\text{año}$ .

El balance de agua en la laguna indica una evaporación de 5  $\text{hm}^3/\text{año}$  obtenida a partir del balance hídrico. Considerando el factor de evaporación de 11.4 obtenido a través de la modelación hidrogeoquímica (Romanelli et al., 2010), siendo la descarga de agua subterránea a la laguna de 6  $\text{hm}^3/\text{año}$ , se obtiene una evaporación de 5.47  $\text{hm}^3/\text{año}$ . Se aprecia la similitud de estos valores obtenidos por diferentes métodos. Teniendo en cuenta que la descarga de agua subterránea afecta el área de la laguna de 5.78  $\text{km}^2$ , se produce un incremento de 1.04 m/año en el nivel de la laguna, de los cuales, 0.95 m/año se evaporan.

## CONCLUSIONES

La construcción del modelo numérico, la calibración de los parámetros del flujo de aguas subterráneas y el cálculo del balance global de masas permitió confirmar el modelo conceptual del sistema Laguna La Salada – acuífero – río Quequén.

La integración de herramientas numéricas de simulación del flujo con estudios previos de modelación hidrogeoquímica permitió evaluar el balance global de masas y alcanzar resultados consistentes de la evaporación en la laguna aplicando diferentes métodos.

La metodología utilizada constituye un aporte al abordaje de estudios sobre la interacción aguas subterráneas – aguas superficiales en la llanura pampeana.

## AGRADECIMIENTOS

Los estudios fueron financiados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través del CRP “*Isotopic techniques for assessment of hydrological processes in wetlands*”, Proyecto: “*Wetlands-groundwater relationship in the Pampa Plain, Argentina, using isotopic techniques. La Salada pond as a case study*”.

## REFERENCIAS

- Bocanegra, E.M., Martínez, D.E., Massone, H.E., Farenga, M.** 2005. Modelación numérica preliminar del flujo subterráneo de la cuenca del Río Quequén, Provincia de Buenos Aires. IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Actas. Tomo1: 191-200. Río Cuarto. Córdoba. . ISBN 950-655-346-1.
- Carrera, J.** 1997. Observación y medidas de la recarga (descarga) a partir de aguas superficiales y conducciones, transferencias y fugas. La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH-GE/IGME. Madrid: 229-245.
- Custodio, E.** 2001. Aguas subterráneas y humedales. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, XXIV: 3-30. NIPO 405-01-003-8.
- Dangavs, N.V.** 2005. En: R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (eds.). Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. La Plata, Velatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, 219-236
- FAO.** 2006. Evapotranspiración de cultivo. Cuadernos Técnicos de la FAO: Riego y drenaje. N° 56. ISSN 0254-5293.
- Finlayson, C.M.; N.C. Davidson, A.G. Spiers and N.J. Stevenson.** 1999. Marine Freshwater Research 50: 717-727.
- Hunt, R.J.; Krabbenhoft, D.P.; Anderson, M.P.** 1996. Groundwater inflow measurements in wetlands systems. Water Res. Research, 32 (3): 495-507.
- Lee, D.R.** 1977. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. Limnol. Oceanography, 22:140-147.
- Lewis, J.B.** 1987. Measurements of groundwater seepage flux onto a coral reef: spatial and temporal variations. Limnol. Oceanography, 32: 1165-1169.
- Martínez G.** 2007. Mapeo geomorfológico con imágenes Landsat 7 y Radarsat 1 en la cuenca del río Quequén Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso de la Asociación española de Teledetección. 19 -21 de septiembre. Mar del Plata, Argentina.
- Medina A, Carrera J** 2005. TRANSIN IV. Fortran code for solving the coupled flow and transport inverse problem. User's guide. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Barcelona, 248 pp.
- Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D., Bocanegra, E.** 2009. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de la laguna La Salada y su relación con el acuífero pampeano, Partido de Necochea, provincia de Buenos Aires. En: Aportes de la hidrogeología al conocimiento de los recursos hídricos. Mariño, E. y Schulz. Eds. Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Buenos Aires. ISBN 978-987-1082-36-0. Tomo II: 601-610.
- Romanelli, O. M. Quiroz Londoño, H. E. Massone, D. E. Martínez, Bocanegra, E.** 2010. El agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del Sudeste Bonaerense, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Boletín Geológico y Minero, 121 (4): 373-386. ISSN: 0366-0176.
- Sacks, L.A.; Herman, J.S.; Konikow, L.F.; Vela, A.L.** 1992. Seasonal dynamics of groundwaterlake interactions at Doñana National Park, Spain. J. of Hydrology, 136:123-154
- Sophocleous, M.A.** 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Hydrogeology Journal, 10, 52-67.
- Teruggi, M.** 1957. The nature and origin of the Argentine loess. Journal of Sedimentary
- Thornthwaite CW, Mather JR** 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. Climatology, vol. X, n.3. 311p.
- Tóth, J.** 1999. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology Journal, Springer-Verlag: 7(1): 1-14
- USDA-SCS** .1964. Hydrology. Section 4, Part I, Watershed planning. In: National Engineering Handbook. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington DC.
- Winter, T.** 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems Hydrogeology Journal. 7:28-45.